

# SF<sub>6</sub> 가스 동축원통전극에서 금속이물 존재시의 전계 해석

(The Electric Field Analysis with Conducting Particle between Coaxial Cylindrical Electrodes in SF<sub>6</sub> Gas)

조국희\* · 곽희로

(Kook-Hee Cho · Hee-Ro Kwak)

## Abstract

This paper describes the influence of conducting particle within the coaxial cylindrical electrodes gap under alternating voltage condition investigated using charge simulation method. If the conducting particles present in the gas insulated system, they can cause decrement of breakdown voltage. Thus, three dimensions computations of electric fields and electrostatic forces have been carried out according to particle location.

The results show a good agreement with those of outside country, which can offer a practical reference on the insulation design of domestic GIS.

## 1. 서 론

문명의 발전에 따른 급속한 산업화로 전력계통의 확장에 따라 이와 관련된 가스절연 시스템의 기술개발도 상당한 진전을 가져왔다. 이로 인하여, 인구의 도시집중화 및 도시기능의 고도화를 유발시켜 전력기기의 소형화, 고성능화가 이루어졌으며, 이러한 요구를 만족시키기 위한 절연매체로서 SF<sub>6</sub> 가스는 송전, 변전, 배전설비에 사용하기 시작하여, 현재는 가스절연기기뿐만 아니라 대용량 변압기에도 가스절연이 적용되고 있다.

GIS는 내부의 고전압 도체와 접지된 외부도체로 구성된 동축원통형 전극으로 전극간은 준평동전계를 형성하고 있어, 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계되어 있다. 그러나 GIS의 금속가공, 연마작업, 운반, 현장조립 및 가스주입시 도체에서의 돌기 및 도전성 금속이물 등이 발생할 수 있으며, 이러한 결함에 의해 축속화, 전계의 균일화된 GIS내에 전계집중 현상이 발생하면 그곳에서 부분방전이 일어나서 절연파괴에 도달할 가능성을 갖고 있다.

본 논문에서는 절연성능의 심각한 저하를 야기시키는 금속이물의 영향을 조사하기 위해 SF<sub>6</sub> 가스내에 금속이물 존재시 프로그램을 통한 해석적 방법을 이용하여 연구를 수행하였다. Maxwell 방정식에 기초하여 유한요소법과 경계요소법의 단점을 보완한 전자계 시뮬레이션을 통하여 대부분의 가스절연기기에 많이 사용되고 있는 동축원통 구조에 교류전압 인가시 도체에 금속이 수직으로 부착되어 있을 때, 탱크 내부(sheath)에 수직상태, 스페이서에 부착되어 있을 때 및 부유되어 있을 때를 가정하여 수치해석을 행하였다.

이 결과를 바탕으로 선형 금속이물의 전계 및 정전력을 계산하였고, 수치해석 결과는 기존 외국의 시험결과와 거의 일치하므로, GIS 절연설계에 있어서 실질적인 기초자료로 활용이 가능하리라 사료된다.

## 2. 본 론

### 2.1. 금속이물 존재시 해석이론

도전성 선형 금속이물의 거동을 정적인 상태부터 부상할 때까지의 과정을 보면 점성력의 공간전하로 인한 코로나 활동에 의해서 형성되는 힉과 영상전하로 인한 힘은 전극 위에 놓여 있는 금속이물의 크기가 무시할 정도로 작으므로 무시할 수 있다. 그러므로 금속이물에 작용하는 힘은 대부분 정전력과 중력이므로 전계내에서 금속이물의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_e - F_g \quad (1)$$

여기서, Fe = QE(t)는 정전력이고, E(t)는 주변전계임  
Fg = mg는 중력이고 m은 이물의 질량,  
g는 중력가속도임

반경이 r이고, 길이가 l인 선형 금속이물이 전극위에 놓여 있는 경우에 있어서, 금속이물에 축적되는 전하 Q와 질량 m은 다음과 같다.

$$Q = 2\pi \epsilon_0 \gamma l E(t) \quad (2)$$

$$m = \rho \pi r^2 l \quad (3)$$

따라서 식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2t}{dt^2} = \frac{2\epsilon_0}{\rho r} E^2(t) - g \quad (4)$$

$E(t) = E_m \sin \omega t$ 이므로

식  $E(t)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d^2t}{dt^2} = \frac{2\varepsilon_0}{\rho r} E_m^2 \sin^2 \omega t - g \quad (5)$$

금속이물이 정적인 상태에서 부상할 때를 고려하면 다음과 같다. 즉  $\frac{dx}{dt}(t=0)=0$ 이고  $x(t=0)=0$ 이므로 식(5)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$x = \frac{\varepsilon_0 E_m^2}{4\rho r \omega^2} (2\omega^2 t^2 + \cos 2\omega t - 1) - \frac{1}{2} g t^2 \quad (6)$$

인가전압의 주파수가  $f$ 일 때  $t=1/2f$ 라고 하면 금속이물이 전극으로부터 떨어져 이동한 거리  $x$ 는 다음과 같다.

$$x = \frac{\varepsilon_0 E_m^2}{8\rho r f^2} - \frac{g}{8f^2} \quad (7)$$

금속이물이 전극으로부터 부상하는 경우, 즉 거리  $x$ 가 0보다 크게되는 경우 인가전계는 다음의 값보다 크게 된다.

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{\rho r g}{2\varepsilon_0}} \quad (8)$$

식 (8)은 부상전계가 교류 인가전압의 주파수에 무관함을 나타내고 있다.

## 2.2. 금속이물 부착위치

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 소프트웨어는 재질들을 임의로 선정할 수 있으므로 가능한 한 실제 GIS와 같은 조건에서 전계해석을 수행하였다. 전계해석을 사용된 금속이물은 선형 도전성 금속이물로서 직경 1[mm], 길이 5[mm]인 구리(Cu)로 전위분포에 따른 등전위, 전계의 세기, 매쉬 분할을 하여 금속이물에 대한 영향을 검토하였다. 이때 전극간(도체하단과 접지된 표면) 거리는 100[mm]로 하였고 접지된 표면은 철(Fe)이며, 금속이물은 SF<sub>6</sub> 가스내에 있는 것으로 하였다. 그림 1은 금속이물의 부착위치를 도시한 것이며 그림 2와 그림 3은 GIS의 3차원 모델로서 스페이서가 있는 부분과 없는 부분을 구분하여 나타내었다.

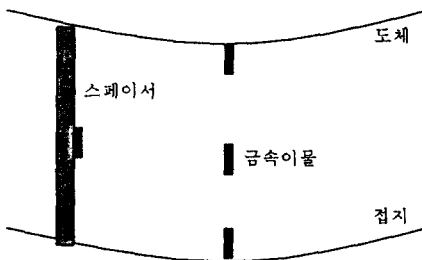


그림 1. 금속이물의 부착상태  
Fig. 1. The attachment condition of particle

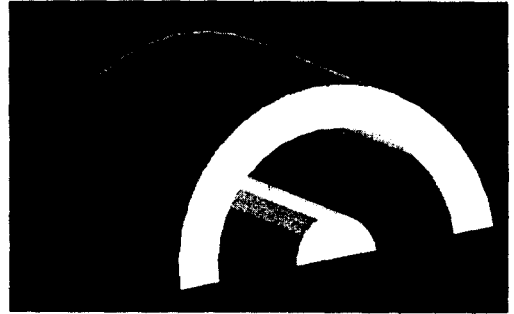


그림 2. QS의 3차원 모델  
Fig. 2. Three dimensions of QS(no spacer)

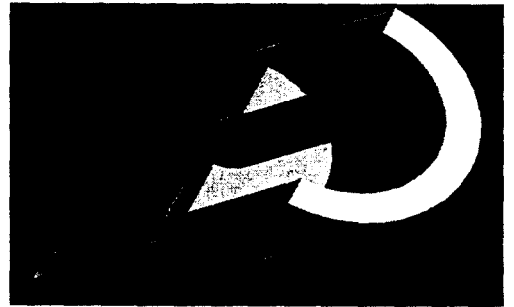


그림 3. QS의 3차원 모델  
Fig. 3. Three dimensions of QS(with spacer)

## 2.3. 전계해석 결과

### 2.3.1 금속이물이 도체에 수직으로 부착되어 있을 때 전계해석

그림 4와 그림 5는 금속이물이 도체에 수직으로 부착되어 있을 때 전계해석으로 전계분포와 전계의 세기를 보여 주고 있으며 전계의 세기는  $1.4 \times 10^6$ [V/m]로 나타났다.

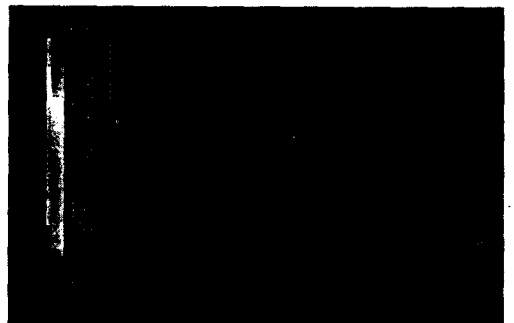


그림 4. 전계 분포  
Fig. 4. Electric field distribution

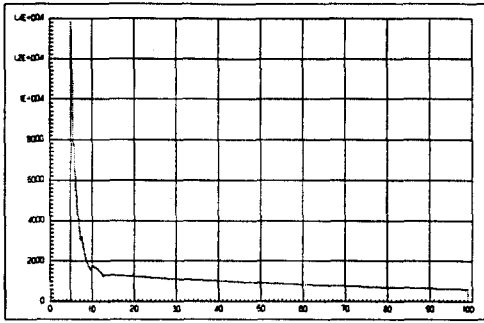


그림 5. 전계의 세기  
Fig. 5. Electric field intensity

### 2.3.2 금속이물이 탱크표면에 수직으로 부착되어 있을 때 전계해석

그림 6과 그림 7은 금속이물이 탱크표면에 수직으로 부착되어 있을 때 전계해석으로 전계분포와 전계의 세기를 보여 주고 있으며 전계의 세기는 1,820[V/m]로 나타났다.

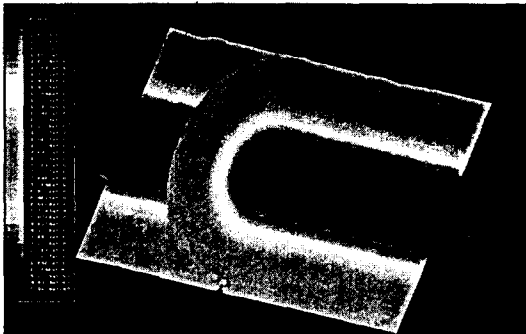


그림 6. 전계 분포  
Fig. 6. Electric field distribution

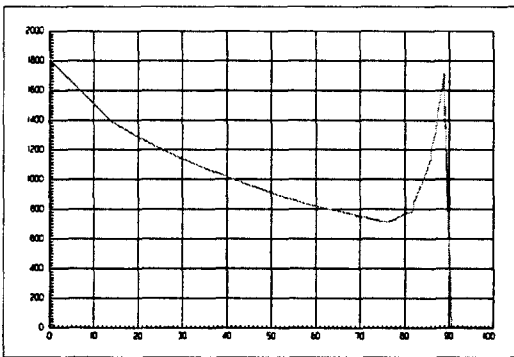


그림 7. 전계의 세기  
Fig. 7. Electric field intensity

### 2.3.3 금속이물이 탱크내부에 수직으로 부유되어 있을 때 전계해석

그림 8은 금속이물이 도체와 접지되어 있는 탱크표면 사이에 수직으로 부유되어 있을 때 전계해석으로 전계의 세기를 보여 주고 있으며 전계의 세기는 도체방향으로 2,900[V/m], 접지방향으로 2,400[V/m]로 나타났다.

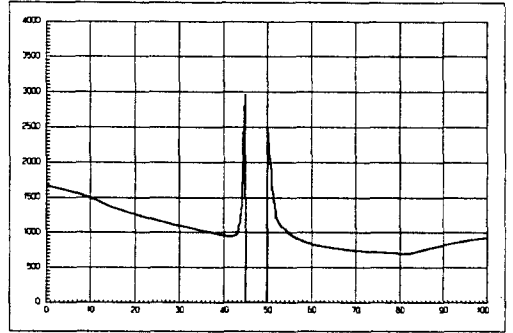


그림 8. 전계의 세기  
Fig. 8. Electric field intensity

그림 5는 금속이물이 도체에 수직으로 부착된 것으로 전계의 세기는  $1.4 \times 10^4$  [V/m]이고, 그림 7은 금속이물이 탱크표면에 수직으로 부착된 것으로 전계의 세기가 1,820[V/m]이며, 그림 8은 금속이물이 도체와 접지되어 있는 탱크사이에 수직으로 부유된 것으로 전계의 세기는 도체방향으로 2,900[V/m]이다. 이와같이 전계의 세기는 금속이물이 도체에 수직으로 부착되어 있을 때 가장 심하게 집중되었음을 알 수 있다.

### 2.3.4 금속이물이 탱크내부 스페이스에 수직으로 부착되어 있을 때 전계해석

그림 9는 금속이물이 탱크내부 스페이스에 탱크표면에 수직으로 부착되어 있을 때 전계해석으로 전계분포를 보여 주고 있으며, 전계의 세기는 금속이물이 도체와 접지되어 있는 탱크표면사이에 수직으로 부유되어 있을 때와 거의 같게 나타났다.



그림 9. 전계 분포  
Fig. 9. Electric field distribution

그림 10은 금속이물이 탱크내부 스페이스에 탱크표면에 수직으로 부착되어 있을 때 전압분포이다.

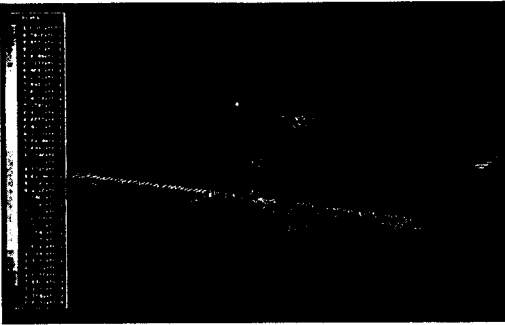


그림 10. 전압 분포  
Fig. 10. Voltage distribution

### 3. 결론

본 논문에서는 가능한 GIS와 같은 조건에서 전계해석을 수행하였으며 전극간(도체하단과 접지된 표면) 거리는 100[mm]로 하였고 접지된 표면은 철(Fe)이다. SF<sub>6</sub> 가스압력이 4[bar]로서 사용된 금속이물은 선형 도전성 금속이물이고 직경 1[mm], 길이 5[mm]인 구리(Cu)에 대해 3차원으로 전위분포에 따른 등전위, 전계의 세기, 벡터 분할을 하여 금속이물에 대한 영향을 검토하였다.

금속이물의 부착위치에 따른 전계해석 결과에서는 금속이물이 도체에 수직으로 부착된 경우에 전계의 세기가 가장 크고, 다음은 금속이물이 도체와 접지되어 있는 탱크사이에 수직으로 부유된 경우( 또한 금속이물이 탱크내부 스페이스에 수직으로 부착된 경우 )이며, 금속이물이 탱크내부 스페이스에 탱크표면에 수직으로 부착된 경우가 가장 낮게 나타났다. 이 결과는 외국문헌과도 거의 일치하며 GIS 절연설계에 있어서 실질적인 기초자료로 활용이 가능하리라 사료된다.

### 참 고 문 헌

- (1) T. Hattori, "A Study on Effects of Conducting Particles in SF<sub>6</sub> Gas and Test Methods for GIS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, 1988.
- (2) Alan H. Cookson, "Particle-Initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF<sub>6</sub>", IEEE Trans. on PAS, Vol. 3, PAS-93, No. 3, pp.343-349, 1973.
- (3) S. Tominaga, H. Kuwahara, K. Hirooka and T. Yoshioka, "SF<sub>6</sub> Gas Insulated Analysis Technique and Its Application for Evaluation of Internal Conditions in Gas Equipment", IEEE Trans. on PAS, Vol. 6, PAS-100, No. 9, pp.4196-4206, 1981.
- (4) F. Endo et Al, "Particle-Initiated Breakdown Characteristics and Reliability Improvement in SF<sub>6</sub> Gas Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, PWRD-1, No. 1, pp.58-65, 1986.